

钢铁热处理丛书

中碳钢热处理

上海市机电工业局編

科学技术出版社

內 容 提 要

本書為上海市机电工業局召開的熱處理會議上的兩篇報告，專門介紹中碳鋼熱處理方面的知識，包括中碳鋼的基本知識、熱處理的實際操作、調質處理三部分。

本書供熱處理工人及技術員閱讀。

中 碳 鋼 熱 處 理

編 者 上海市机电工業局

*

科 學 技 術 出 版 社 出 版

(上海南京西路 2004 號)

上海市書刊出版業營業許可証出 079 號

上海市印刷四廠印刷 新華書店上海發行所總經售

*

開本 787×1092 紙 1/32 · 印張 11/16 · 字數 15,000

1958 年 7 月第 1 版

1958 年 9 月第 2 次印刷 · 印數 5,001—10,000

統一書號: 15119 · 714

定 價: (9) 0.10 元

序

热处理一般是机械零件最后一道工序的前道工序。它能改善工件的机械性能，改進結晶組織，提高工件的硬度、强度和耐腐耐蝕的性能，所以是机器生產中很重要的一道工序。

过去这道工序是生產中最薄弱的環節，技術經驗和生產設備較差，在生產中報廢和回收較多。这样，不僅影响生產任务的完成，而且一旦報廢，就会把許多前道工序的劳动成果亦就都報廢了，造成生產中的最大浪費。为此，上海市机电工業局于1957年間召开热处理專業會議，交流經驗，以提高技術。

我們要多、快、好、省地建設社会主义，在机器制造業中更殷切的要求提高热处理的技術水平和管理水平。于是再把上海市机电工業局热处理專業會議上交流的經驗，刊印出版，以期促進热处理工作的提高。其中許多經驗，特別是一些節約的小經驗，現實意義重大，適用於中小型工厂的热处理車間。但是這些經驗有的還很不成熟，尚祈讀者提出寶貴的意見，以便進一步提高。

上海市机电工业局

目 錄

一、中碳鋼的基本知識(朱洪健).....	1
1. 鋼的組織和化學成分	1
2. 計算碳素鋼的組織成分	2
二、熱處理的實際操作(朱洪健).....	3
1. 鍛造過程	3
2. 正火和退火	4
3. 淬火	5
4. 回火(即配火)	5
三、調質處理(諸鳳翔 白承新).....	6
1. 調質熱處理的基本概念	6
2. 調質用鋼	7
3. 調質對鋼材機械性能的影響	11
4. 調質處理工藝舉例	13
5. 技術參考資料	17

一、中碳鋼的基本知識

1. 鋼的組織和化學成分

一般常用的中碳鋼的化學成分是 C 0.4~0.5% ; Mn 0.5~0.75% ; Si 0.20~0.30% ; P 0.035% ; S 0.035% 。碳素鋼所含的元素,除鐵和碳以外,還有錳、矽、磷、硫、氧和微量的氮、氫、鋁、銅、砷等。這些元素中主要的是碳和鐵,其餘的是在煉鋼時除不清的雜質,如磷、硫、砷、氮和氫等,在煉鋼時力求鋼中的雜質轉化為廢物,而大部分是可以消除的,如氧化矽、氧化錳和氧化鋁。銅元素在鋼中不但與鐵化合成為低溫硬化,並且也有較輕的抗銹性。

碳與鐵化合成為固溶體。在溫度上升時, α -鐵就變到 γ -鐵。假如溫度緩慢下降,結果所形成組織就可按照碳素成分而定。在金相方面來說:這些組織叫做鐵素體、珠光體和滲碳體。

鐵素體——在室溫時的含碳量幾乎近於零,因此它的性質很軟。抗拉力較弱和較高的伸長率,所以叫做鐵素體。鐵素體不可硬化,在高溫時它形成 γ -結晶;在快速冷卻時就可轉回 α -結晶,但比退過火的鐵素體的硬度有顯著增高(這是因為含有微細的固溶體轉變到馬氏體的關係),經過 4% 硝酸腐蝕後,它的結晶顏色呈白色。

珠光體——在檢查鋼中的晶粒時,經過 3% 硝酸腐蝕後,所發現的顏色與珍珠顏色相同,因此叫做珠光體。珠光體的結晶有兩種: 1. 片狀結晶, 2. 球狀結晶。經過加熱到完全退火的溫

度和均热時間以及再在爐內緩慢冷却后，結果就形成片狀珠光体。假如在不完全退火的溫度，同时在此溫度停留較長的時間，然后在爐內緩慢冷却，結果就形成球狀珠光体。

球狀珠光体是一个最穩定的組織，在共析鋼方面來說，这个組織是最容易加工，同时硬化后在变形方面也比较小。

滲碳体(即碳化鉄— Fe_3C)——碳素鋼的強度和硬度是依靠含碳量的高低而定。碳与鉄化合时会成为滲碳体，但滲碳体含有一定的碳量(即 6.67%)。鋼的含碳量越高，則游离滲碳体越多。相反，含碳量越低，則鉄素体越多。

滲碳体本身的性質是硬而脆，不可用淬火方法再來提高它的硬度了，因为其本身的性質沒有轉變的可能。假如在金相檢查时，預先磨成象鏡子一样的光亮，再用 4% 硝酸腐蝕后，在顯微鏡下可以看到它的結晶是雪亮的。

2. 計算碳素鋼的組織成分

我們知道滲碳体的含碳量最多不会超过 6.67%，这就是說，当鋼鉄中含有 6.67% 的碳量时，就可成为 100% 的滲碳体了。同时，我們也知道在 100% 珠光体的含碳量是 0.83%，假如用这个含碳量來計算它的滲碳体成分的話，就等于 12.5% (即 $\frac{100 \times 0.83}{6.67} = 12.5\%$)。因此珠光体形成时，就混合有 12.5% 的滲碳体和 87.5% 的鉄素体(即 $100\% - 12.5\% = 87.5\%$)。

滲碳体的分子量是 180 (即 $\text{Fe}_3\text{C} = 56 \times 3 + 12 = 180$)，这就說，15 个滲碳体 (Fe_3C) 分子量等于 1 个含碳量(即 $180 \div 12 = 15 \text{ Fe}_3\text{C}$)，为了計算方便起見，我們預先計算珠光体的系数。

当珠光体結晶形成时，有 87.5% 鉄素体和 12.5% 滲碳体，按照 100% 珠光体含有 0.83% 的碳量來推算的話，那么我們应

該有 7 个鉄素体方能成为珠光体(即 $87.5 \div 12.5 = 7$), 1 个渗碳体加上 7 个鉄素体是等于 8 个珠光体, 而 $15 \times 8 = 120$ 是珠光体的系数(即 15 个 $\text{Fe}_3\text{C} \times 8$ 个珠光体 $= 120$)。

例如: 中碳鋼的含碳量是 0.4% 的話, 那么珠光体成分就可达到 48% (即 $120 \times 0.4\% = 48\%$) 其余是 52% 鉄素体。假如含 0.5% 碳量时, 那么珠光体的成分就可提高到 60%, 同时鉄素体降低到 40%, 在这些情况下, 一般中碳鋼含有碳量在 0.4 到 0.5% 时, 它的金相組織只有两种: 即 1. 是鉄素体; 2. 是珠光体。这些組織的成分(按照以上計算过的方法計算), 在 0.4% 的碳鋼來說, 鉄素体为 52% 和珠光体为 48%, 但在 0.5% 的碳素鋼, 鉄素体有 40% 和珠光体有 60%, 如圖 1 所示。

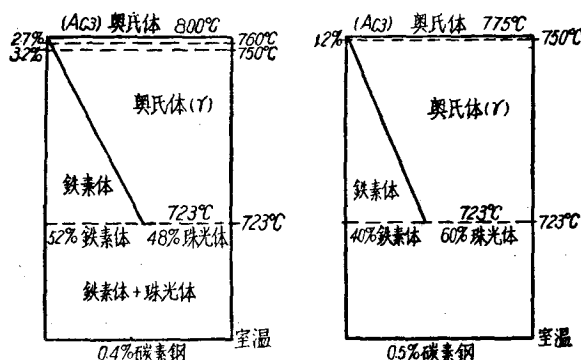


圖 1 在 723°C 以上鉄素体开始轉变到奥氏体的情况

二、 热处理的实际操作

1. 鍛造过程

鍛造机件时, 不但加热的温度必須均匀(即在 1150°C 左右), 而且需要停留一些時間方能鍛打。如鍛打完成后的温度过高时,

就会產生較粗的晶粒,这是因为奥氏体停留較高温度的緣故。我們知道,在較粗的晶粒形成以后,其机械性能(即抗拉力、冲击力)就会受到影响。假如加热时的温度超过本身鍛打温度 200°C (即 1350°C) 时,其表面上所形成氧化鉄就会溶化,而流入到晶界里。这些液体氧化鉄在鍛打时会破坏結晶与結晶之間的凝結,結果產生微細的裂紋。

2. 正火和退火

中碳鋼經過鍛打后,結晶肯定有粗細不均的現象,在这种情况下,必須經過 Ac_3 以上 20°C 加热,并在这个温度上停留一个時間后,才能放在空气中冷却或在油中冷却,这个作用是促使相变而形成較細的結晶。例如:两根合併起來 3 噸重的曲軸是 45 号碳素鋼鍛成的,經過預热 10 小时,在 860°C 加热也是 10 小时,再在 870°C 停留 12 小时,然后出爐,結果進爐前的晶粒号是 1~3,但出爐以后就可以达到 5~8 号。

假如經過油中冷却以后,必須進行退火,退火的目的是促使工件达到容易加工的硬度,同时也可消除冷却时所產生的应力。

退火——退火是根据工件大小和組織,來決定它的均热時間,例如:工件最大尺寸是 1 寸厚,而要求球化狀態,这就需要在 715°C 左右和 10 小时的均热時間。

在調質前工件必須放加工的余量(在一般來說 3 公厘左右),調質后对于精加工时表面上脫碳部分可以消除。假如变形过大,那么,奥氏体温度就不够均匀。假如变形較小則調質前的組織是球化狀態,但这些組織是促使奥氏体在轉變时有很大的作用,这就是說,奥氏体形成时比較均匀些。

3. 淬 火

加熱到 A_{c_3} 以下的目的是促使奧氏體轉變到馬氏體而膨脹時，剩餘的鐵素體可降低內應力，以免發生裂紋。如圖 1 所示，在 0.4% 中碳鋼加熱溫度在 $750 \sim 760^\circ\text{C}$ 之下，有 3.2~2.7% 鐵素體仍然未達到固溶體狀態。

操作——例如 0.45% 中碳鋼預熱（最好在 45% 氯化鈣鹽浴爐預熱，溫度 650°C ，時間 30 分鐘左右，或按機件厚薄而定），以後立刻轉到 $750 \sim 760^\circ\text{C}$ 鹽浴爐里，然後在此溫度均熱 10 分鐘左右在 5% 鹽水中瞬時，然後在油中冷卻，結果就可達到硬度洛氏 (R_c) 55 左右，並且沒有發現裂紋的現象。

變形方面——假如細長或厚薄不均的工件，在 $750 \sim 760^\circ\text{C}$ 均熱而冷卻，使其變形與其他熱處理工件的變形比較小些，同時在矯正方面也比較容易些。

淬火發生裂紋的原因——0.4~0.5% 碳素鋼在奧氏體 800°C 均熱時，全部鐵素體成為固溶體狀態。在快速冷卻時，促使表面部分成為馬氏體，而中心部分成為珠光體 + 索氏體或屈氏體 + 索氏體的混淆組織。當馬氏體開始膨脹時，本身的內應力和本身的抗拉力同時增加，但中心部分的混淆組織仍然是存在，在這情況下，這些內應力超過本身抗拉力時就會造成破裂的現象，尤其是機器零件的切面有厚薄不均的形狀時，例如：中碳鋼車頭心子加熱到 A_{c_3} 和均熱後，放在 5% 鹽水中冷卻，然後轉到油中慢冷，結果在薄的地方發現有裂紋。車刀方架子在 A_{c_3} 時均熱後，放在 5% 鹽水中冷卻，然後轉到油中慢冷，結果在方角部分發現有裂紋。

4. 回火(即配火)

沒有配火以前，預先放在開水中煮一小時左右，目的是消除

在冷却转变时的应力。在配火时是按厂方的要求而定。例如要求洛氏 (R_c) 40~45 时, 它的配火温度就是 380°C 1 小时, 如表 1 所列是指明配火时的温度与硬度(洛氏)的关系。

表 1 中碳钢配火硬度

配火温度 $^{\circ}\text{C}$ (时间 1 小时)	洛氏硬度 (R_c)
200	50
250	48
300	46
350	42
400	40
450	35
500	32
550	27
600	22
650	18

三、調質处理

1. 調質热处理的基本概念

調質处理是一种双重处理, 即把零件加热到 A_{c3} 以上, 保持若干时间后, 再在水、油或空气中冷却, 作淬火或正火处理, 然后把零件加热到稍低于 A_{c1} 的温度, 作高温回火, 以获得一定分散度的铁素体+渗碳体混合组织。由于在这种状态下的渗碳体呈粒状, 所以称这种混合组织为回火索氏体, 以与呈片状渗碳体+铁素体混合组织相区别。

淬火+高温回火, 是一般结构零件最广泛地采用的調质处理, 在钢种和形状大小能保证较好的淬透性条件下, 能获得最好的机械性能, 这种双重处理, 常被采用为最后的热处理。

正火+高温回火，常被用來处理具有奥氏体高穩定性的合金結構鋼，來代替退火，以獲得較退火状态更低的硬度，便利切削加工。这种双重处理对某些合金結構鋼來說，所利用的时间，往往比退火所用的时间为短。另一方面，这种双重处理，也被采用为重要零件的鍛坯預备热处理。

調質热处理可以用在預备热处理上，其目的是为消除坯件中的原始的不良組織，增加組織的均匀度，为最后热处理作好准备，使最后热处理獲得更好的效果。这种处理，常用在某些重要零件的鍛坯上，如汽車、內燃机等的傳动齒輪及变速齒輪等。

調質热处理实际上已廣泛的作为最后热处理，其目的是獲得中等强度(与淬火+低温回火时比較)、高的屈服点与强度的比值、高塑性及高冲击韧性等机械性能。尤其是高的屈服点与强度的比值，以及高的断面收縮率是調質处理的一种顯著的优点。如采用退火或正火的方法，使獲得与調質处理后相似的硬度，但由于其組織为片狀組織，而調質者呈粒狀，且較細，两者的抗拉强度極限大致相似，延伸率也大致相似，但調質处理后的零件，他的屈服点与断面收縮率將高得多。由于調質处理具有这些优良的特点，且为其他热处理方法所难以达到的緣故，所以調質处理才被廣泛利用在机械制造業中的机械零件生產上。

2. 調 質 用 鋼

碳素結構鋼和合金結構鋼中，含碳量在 0.25~0.45% 的鋼种，最適于進行調質处理，所以称这类鋼为調質鋼。又因含碳量適中，亦称中碳調質結構鋼，常用的一些調質鋼如下。

(一) 碳素調質結構鋼为 25; 30; 35; 40; 45 (由于这类鋼的淬透性較差，僅利用在截面不大的零件上)。

(二) 合金調質結構鋼為(1)鉻鋼: 35 為 $\square$; 40 為 $\square$; 45 為 $\square$; (2) 鉻鉬鋼: 30 為 $\square$; 35 為 $\square$; (3) 鉻錳鋼: 40 為 $\angle$; 35 為 $\angle$; (4) 鉻鎳鋼: 40 為 $\square$; 30 為 $\square$; 37 為 $\square$; (5) 矽錳鋼: 27 為 $\angle$; 35 為 $\angle$; (6) 鉻鎳鉬鋼: 33 為 $\square$; 40 為 $\square$; (7) 錳鉬鋼: 40 為 $\angle$ 。

各種調質鋼材具有各種不同的淬透性(淬硬性,可硬化性), 每種鋼材又有化學成分及熔煉情況等等的不同, 因此每種鋼的可硬化性有上下限值, 形成了硬化性帶。各種機械零件, 各有不同的機械性能的要求, 這些要求是選擇調質鋼種及其熱處理方法的主要依據。而這些要求是否能达到, 則與淬透性密切相關, 因為只有從經過淬火得到馬氏體, 再經高溫回火獲得的索氏體組織, 才具有最好的綜合機械性能。另一方面為了合理和經濟地使用鋼材, 也有必要研究選擇最廉價的, 最適合要求的鋼種, 以節約貴重的合金鋼。

由於我國目前鉻、鎳元素較少, 這樣對於目前較普遍採用的鉻鎳鋼種, 應用就受到了限制。目前曾試以 40 $\angle$ $\square$ 鋼, 40 $\angle$ $\square$ 鋼來代用, 現把試驗結果介紹如下。

(一) 上海材料應用科學研究所試驗結果:

(1) 材料成分: C 0.39%; Mn 1.6%; Si 0.24%; S 0.009% Mo 0.31%; Ni 0.06%。

(2) 測定其臨界點:

$$A_{c1} = 733^{\circ}\text{C}; \quad A_{c3} = 779^{\circ}\text{C}。$$

(3) 淬透性試驗: 如圖 2 (試棒先 880°C 正火, 淬火溫度 840°C , 保溫 20 分鐘)。

(4) 調質處理後性能:

a. 機械性能如表 2 所列。

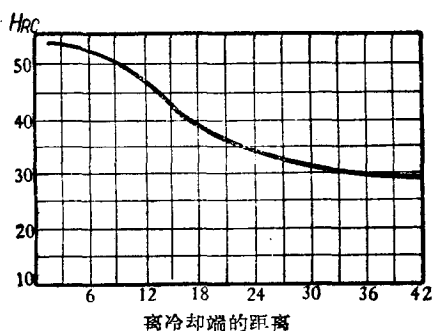


圖 2 40Cr鋼硬化性

表 2

熱處理	屈服點 (公斤/平方公厘)	抗拉強度 (公斤/平方公厘)	延伸率 (%)	斷面收縮率 (%)	硬度 (布氏)	沖擊韌性 (公斤公尺/平方公分)
880°C 正火 610°C 回火	58.0	77.6	19.7	32.0	217	12.2
880°C 正火 840°C 油淬 610°C 回火	89.5	99	16.7	61.7	285	17.7

b. 調質處理後,在不同溫度情況下的沖擊值如表 3 所列。

表 3

溫度(°C)	60	40	20	0	-20	-40	-60
沖擊韌性 (公斤公尺/平方公分)	18.5	17.5	17.7	17.8	17.9	16.9	10.2

(試棒 840°C 淬火、610°C 回火。其值除 20°C 為五個試樣的平均值外,其餘均為四個試樣的平均值)

c. 淬火後及調質處理後的金相組織如圖 3、4 所示。

圖 3 为淬火后組織(馬氏体),圖 4 为調質后組織(回火索氏体)。

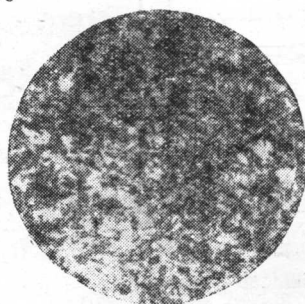


圖 3 $\times 500$

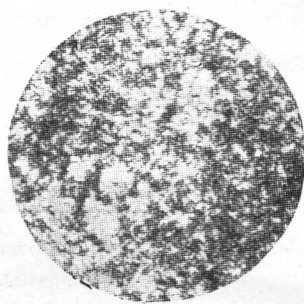


圖 4 $\times 500$

(5) 回火脆性試驗:

a. 將 25×25 方試样在 840°C 油淬,分別在不同溫度回火,并使試样 $\frac{1}{2}$ 水冷 $\frac{1}{2}$ 爐冷,其冲击值如表 4 所列。

表 4

回 火 溫 度 ($^{\circ}\text{C}$)	650		600		550		500	
冷 却 方 式	水冷	爐冷	水冷	爐冷	水冷	爐冷	水冷	爐冷
室 溫 冲 击 值 (公斤公尺/平方公分)	19.2	18.5	14.7	14.6	12.1	12.4	11.4	11

b. 840°C 油淬, 610°C 回火一小时,試样 $\frac{1}{2}$ 爐冷, $\frac{1}{2}$ 水冷,在溫度为零度以下的冲击值如表 5 所列。

表 5

冲 击 溫 度 ($^{\circ}\text{C}$)	-20		-40		-60	
610°C 回火冷却方式	水冷	爐冷	水冷	爐 冷	水 冷	爐冷
冲 击 值 (公斤公尺/平方公分)	17.6	16.7	16.9	14.9	10.2	9.7
断 口 类 型	塑性	塑性	塑性	部分脆性	大部分脆性	脆性

(二) 曾利用 40 $\angle$ 鋼做 59"/16 鉗杆接头 70 只。其过程和結果如下:

(1) 总工藝: 澆鋼 → 截料 → 鍛造 → 粗加工 → 磁粉探伤 → 調質 → 精加工。

(2) 热处理工藝: 840~860°C, 保温 35 分鐘油淬; 620~640°C 箱形爐回火, 并水冷。

(3) 調質处理后性能檢查:

a. 机械性能如表 6。

表 6

屈服点 (公斤/平方公厘)	抗拉强度 (公斤/平方公厘)	延伸率 (%)	收縮率 (%)	冲击值 (公斤公尺/平方公分)
86	98	19.5	65.5	17

(試样取自零件最厚心部之处, 參看圖 3)。

b. 金相組織: 为回火索氏体, 如圖 5。

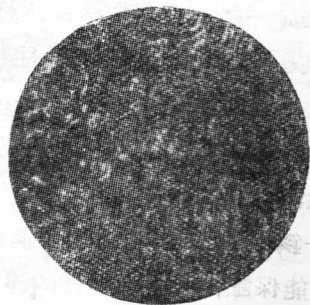


圖 5 $\times 500$

从以上数值來看, 40 $\angle$ 鋼可以代替 40 号, 40 号 B 等鋼, 其价格較高, 同时切削性能較差, 是 40 $\angle$ 鋼的缺点。

3. 調質对鋼材机械性能的影响

調質处理后的机械零件, 具有較高的强度和韌性。前面已

經提过，这是由于具有回火索氏体之故。而回火索氏体由鉄素体与粒狀滲碳体組成。所以調質处理后机械性能的优劣，就决定于鉄素体和滲碳体的性質、数量和分布狀況，調質后的强度，决定于索氏体中滲碳体的数量、形态和分布狀況；而对于合金元素加入所引起的鉄素体强度的增加的影响是較小的；但韌性是取决于索氏体中鉄素体的性質的。

碳的影响——鋼結構中滲碳体的数量是决定于鋼中碳的含量，鋼中含碳量愈多，形成的滲碳体也愈多。根据現有資料，調質鋼中的含碳量在 0.25~0.45% 最合適。含碳量再增加，强度虽增，但引起韌性的顯著下降；当含碳量小于 0.25% 时，則滲碳体形成量將减少到顯著地影响强度等性質。

回火索氏体中滲碳体集聚程度愈小，分布愈均匀，其性能也愈好。滲碳体的集聚和分布是决定于高温回火的温度和鋼中其他元素的性質。温度愈高，滲碳体集聚程度也愈大，对于淬火內应力的去除也愈大。一般为了不使滲碳体过于集聚，而又能使淬火时產生的內应力最大限度地去除，往往鋼中加入了能阻止滲碳体集聚的合金元素（实际上已成为合金的特殊碳化物），减低滲碳体集聚能力。这样就可以采用較高的回火温度，而不致影响处理后的性能。

鉻的影响——鋼中加入了鉻，增加了鋼在冷却过程中奥氏体的穩定性，因此能保証較大截面零件的淬透性。所以鉻鋼往往被利用來制造較大截面的零件；另一方面，鉻是形成滲碳体的元素，因此增加了鋼的强度。在含碳量 0.3~0.4% 的鉻鋼中，鉻从 1.2% 增至 4.35%，强度逐漸增加，并不顯出韌性的下降。但鉻鋼具有对回火脆性的敏感性，所以高温回火后，必須速冷。

鎳的影响——鋼中加入了鎳，提高了鉄素体的强度与韌性。

在調質鋼中，往往和鉻同時加入鋼中，制成鎳鉻鋼。由于鎳鉻同時存在，使鋼的淬透性增加很多，因此多用來制造大截面的零件。鎳鉻鋼具有很敏感的回火脆性，即在高溫回火后緩冷，沖擊韌性急劇下降。所以高溫回火后，必須在油或水中冷卻。

錳的影響——錳是形成滲碳體的元素，它使臨界點降低，降低了臨界冷卻速度，增加了鋼的淬透性。但錳是最易促使產生回火脆性的元素，因此錳鋼具有對回火脆性的敏感性，在高溫回火后應速冷。錳通常和矽在一起，制成矽錳鋼；與鉻一起成鉻錳鋼。目前我國科學院冶金陶瓷研究所正在研究新鋼種——錳鉬鋼。

鉬的影響——鉬是形成滲碳體的元素，并使滲碳體集聚過程變緩，增加了強度。提高了奧氏體晶粒長大的溫度，并能消除鋼對回火脆性的敏感性，因此通常加入具有回火脆性敏感的鋼種中，防止回火脆性的產生。如錳鉬鋼，鉻鉬鋼，鉻鎳鉬鋼等。我國富有鉬礦，將來新鋼種中，勢必離不開鉬，所以鉬在鋼中的影響有進一步探討的必要。

矽的影響——矽使鋼的強度增加；而對韌性的影響，只有當含矽量在2%以上時，才使韌性下降。含矽1.5%的鋼中未顯出對韌性不利的影響。所以在含矽的調質鋼中，其含矽量在1.5%以下。同時矽使鋼具有回火穩定性，即硬度能保持在較高回火溫度而不顯著下降。矽鋼也具有回火脆性，所以回火后應在水或油中冷卻。

4. 調質處理工藝舉例

(一) 地質鉆井用50公厘鉆杆接头

(1) 材料：35丁 $\angle$ 。

(2) 機械性能要求：布氏硬度：241~302；抗拉強度： ≥ 80